

рах менее 28 мм длины труб не характерны для теплообменных элементов.

Так же был построен график зависимости скорости воздуха от внутреннего диаметра трубы (рис. 3).

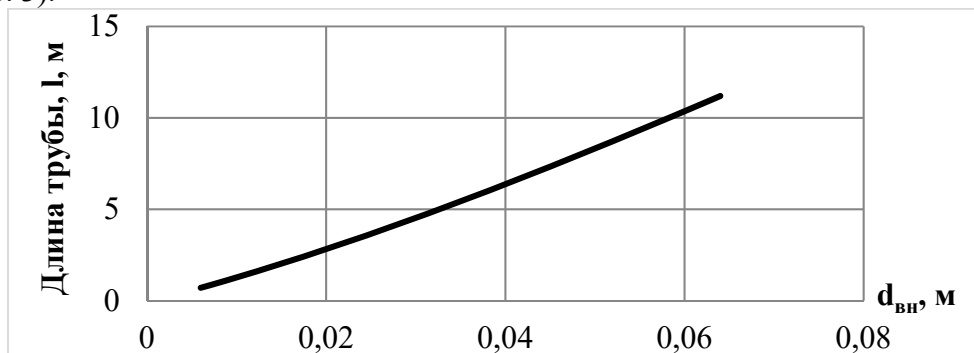


Рис. 2. График зависимости длины трубы от внутреннего диаметра

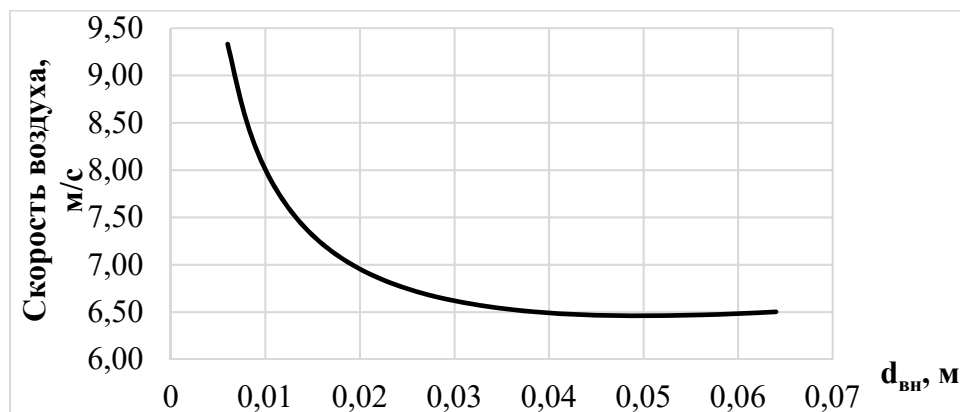


Рис. 3. График зависимости скорости воздуха от внутреннего диаметра трубы

По представленному графику можно сделать вывод, что при достижении диаметра труб 32 мм и более скорость воздуха становится равно 6,5 м/с и практически перестает изменяться, т.е. больше не зависит от увеличения диаметра.

Список использованных источников

1. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981.
2. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). – изд. 3-е, перераб. и доп. – СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. – 255 с.
3. Гильметдинова Ю.Р., Степанов Д.Н., Микула В.А. Разработка концепции теплообменного элемента конвективного высокотемпературного нагревателя компримированного воздуха // Конференция молодых ученых – 2016, УрФУ, 2016.

УДК: 004.94, 536.7, 621.444

И. В. Южаков, Е. И. Левин

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ВЫБОР МОДЕЛИ ГОРЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ И СИНТЕЗ-ГАЗОВ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГТУ

Аннотация

Проведен обзор различных методов моделирования процессов горения и турбулентных потоков в камерах сгорания газотурбинных установок (КС ГТУ). Определены математические условия и ограничения методов, основанных на решении системы уравнений Навье-Стокса. По данным решениям выделены три модели: $k-\epsilon$, $k-\omega$ и LES, по повышению сложности и точности моделирования, соответственно. Выделены границы применимости каждого рассматриваемого метода, а также особенности моделирования каждой математической системой. Определены основные преимущества и недостатки рассматриваемых методов. Приведены примеры наиболее характерных физических систем. Описаны результаты их моделирования, а именно полученные характеристики турбулентного потока и градиенты параметров систем, а также изученные особенности КС и режимов горения.

Ключевые слова: моделирование, турбулентное горение, камера сгорания, ГТУ, уравнения Навье-Стокса.

Abstract

The review of various methods of simulation of combustion processes and turbulent flows in the combustion chambers of gas turbine units is carried out. The mathematical conditions and limitations of methods based on the solution of the Navier-Stokes system of equations are determined. According to the solutions, three models are distinguished: $k-\epsilon$, $k-\omega$ and LES, by increasing complexity and modeling accuracy, respectively. The boundaries of applicability of each considered method are singled out, as well as the features of modeling by each mathematical system. The main advantages and disadvantages of the methods are determined. Examples of the most characteristic physical systems are given. The simulation results are described, namely the obtained characteristics of the turbulent flow and the gradients of the system parameters. The features of CS and burning regimes are studied.

Keywords: modeling, turbulent combustion, combustion chamber, gas turbine engine, Navier-Stokes equations.

Большинство отечественных металлургических предприятий используют побочные продукты (доменный, коксовый, конвертерный газ и др.) в качестве вторичных энергетических ресурсов в печах или на собственных ТЭЦ. Мировые лидеры производства чугуна и стали Япония и Китай используют более современную и эффективную схему сжигания доменного газа в ПГУ, подавая его не в котел-утилизатор, а в камеру сгорания газовой турбины [1].

Исполнение ПГУ содержит камеру сгорания (КС) газовой турбины для сжигания газового топлива. Эффективность газотурбинной установки может быть повышена за счет КС, а именно посредством исследования турбулентного горения топлива в ней. Данные работы требуют предварительного математического моделирования различных процессов горения, наиболее точными и распространенными из которых являются $k-\epsilon$, $k-\omega$ и LES модели.

Целью данного исследования является изучение различных систем моделирования турбулентного горения для дальнейшего выбора наиболее подходящей математической системы для моделирования КС ГТУ работающей на бедных промышленных и синтез-газе.

1. Модели горения

Течение в КС ГТУ характеризуется большими градиентами параметров, интенсивностью закрутки и высоким уровнем турбулентности. Выбор модели турбулентности зависит от характера турбулентного потока, требуемой точности, доступных вычислительных ресурсов и времени, которое допустимо затратить на решение задачи. В практике инженерных расчётов широко используются модели, базирующиеся на осреднённых по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса (RANS), в частности, моделях семейств $k-\epsilon$, $k-\omega$, LES.

Модели $k-\epsilon$ имеют большое число как высоко-, так и низкорейнольдсовых модификаций, таким образом данный тип моделирования применим, как к центральной части турбулентного потока, так и в пограничном слое.

Моделирование $k-\omega$ схожи с предыдущей моделью, однако в ней вместо уравнения диссипации решается уравнение для скорости диссипации турбулентной энергии. Данная система моделирования наиболее удобна для пограничных слоев и КС сложной геометрии.

Основная идея LES состоит в частичном осреднении уравнений Навье-Стокса так, что крупные вихри рассчитываются как в методе прямого численного моделирования (DNS), а влияние мелких диссипативных вихрей учитывается в уравнениях движения вязкой жидкости. Недостатком метода является его трудоемкость и высокие требования к вычислительным мощностям, что ограничивает широкое практическое применение данного метода.

2. Верификация систем моделирования

• Система $k-\varepsilon$

Для данной модели характерны высокая точность, относительно малые затраты вычислительных мощностей и широкий диапазон применимости, поэтому она используется для моделирования множества систем, однако проявляет неопределенность при описании турбулентных потоков сложной геометрии, а также при описании течения в пограничном слое.

Успешное использование модели $k-\varepsilon$ отмечено для моделирования эмиссионных характеристик и температурных полей в камере сгорания [2], для исследования градиента скоростей и концентраций, определения зоны тепловыделения [3], изучения процессов горения с низким уровнем выбросов оксидов азота. На рисунке 1 представлено сравнение экспериментальных данных с расчетами по модели $k-\varepsilon$ для исследования зависимости скорости потока от коэффициента избытка топлива в сжигаемой топливовоздушной смеси.

Теоретические исследования процессов горения посредством системы $k-\varepsilon$ были проведены для модели камеры сгорания с вводимыми осевыми и вихревыми потоками и пристенной струей [4]. Особенностью данной работы является моделирование различных углов ввода топливовоздушной смеси в КС.

В каждом из приведенных случаев, моделирование типа $k-\varepsilon$ показало высокую точность и соответствие опытным данным.

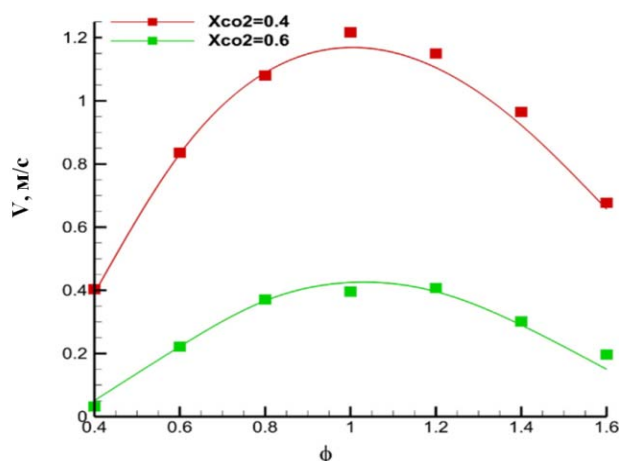


Рис. 1. Рассчитанные (линии) и измеренные экспериментально (квадраты) значения скорости пламени (V) в зависимости от коэффициента избытка топлива (ϕ) для топливовоздушной смеси, где $X_{\text{co}2}$ – доля углекислого газа в смеси

• Система $k-\omega$

Математически более сложная модель $k-\omega$ применима только к описанию турбулентности в пограничном слое, что связано с характерной для пристеночной области скоростью диссипации энергии.

Так $k-\omega$ была успешно применена для математического описания воспламенения природного газа в камере сгорания ГТУ: модель отразила форму потоков со сложной закруткой и сильным градиентом температур [5], а также позволила выполнить оптимизацию эффективного режима горения, распределения температур, объемов выбросов и определить необходимые условия для минимизации производства энтропии [6].

Система $k-\omega$ в некоторых случаях применяется для малых камер сгорания со сложной геометрией для описания турбулентности не только в пограничном слое, но и в центральной части КС [1], а также для исследования потоков в трубах малого диаметра. Так система $k-\omega$

позволила построить достаточно точные 2D и 3D модели течения узкой трубы, транспортирующей газ (рис. 2).

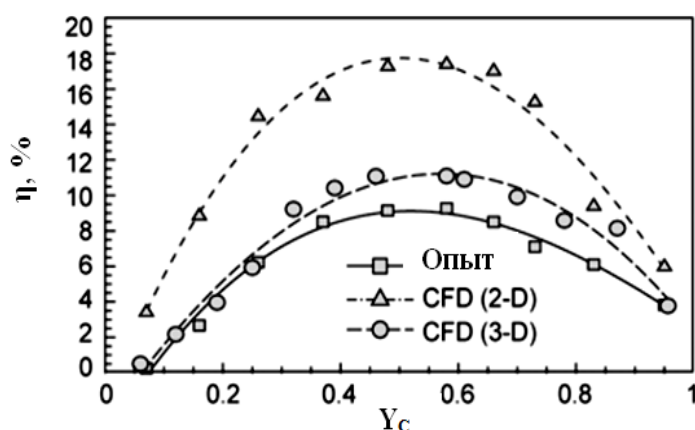


Рис. 2. Сравнение изоэнтальной эффективности (η) при изменении массового соотношения (Y_c) газовых составляющих, полученной экспериментально и с помощью 3D и 2D моделей

- Система LES

Моделирование методом LES применяется для стационарных (трехмерное исследование горения топливных газов [7]) и нестационарных (расчет многозонной камеры сгорания, используемой для восстановления низкокалорийных газов [8]) моделей горения. Так, система LES позволяет моделировать градиенты температуры и скорости потоков, исследовать поля давления и концентраций окислителя, топлива, продуктов сгорания и коэффициента избытка воздуха в зоне горения, а также изучать акустические процессы в КС различных типов [9].

Особенностями вышеперечисленных систем являются высокая турбулентность потоков в КС, сложность геометрии камеры сгорания и высокие требования к точности вычислений, что и обуславливает использование модели LES.

В данной работе приведены наиболее распространенные для прикладного моделирования математические системы турбулентных процессов. Выполненный обзор показал, что для расчета неравномерности распределения температур на выходе из камеры сгорания промышленной ГТУ и оценки уровня выбросов оксидов азота может быть использована k-ε модель, обладающая высокой точностью и относительно малыми затратами вычислительных мощностей.

Список использованных источников

1. Making More Efficient Use of Blast-Furnace Gas at Russian Metallurgical Plants / A.F. Ryzhkov, E.I. Levin, P.S. Filippov, N.A. Abaimov, S.I. Gordeev // Metallurgist, 2016. – PP. 1–12.
2. Эмиссионные характеристики и температурная неравномерность на выходе из камеры сгорания ГТУ / А.Н. Сабирзянов, Б.В. Явкин, Ю.Б. Александров, А.Н. Маркушин, А.В. Бакланов // Вестник СГАУ, №3 (41), 2013, часть 2. – С. 165–172.
3. Анализ применимости моделей горения для расчета многофорсуночной камеры сгорания ГТД / Б.Г. Мингазов, В.Б. Явкин, А.Н. Сабирзянов, А.В. Бакланов // Вестник СГАУ, №5 (29), 2011. – С. 208–214.
4. A parametric study on the factors affecting gas turbine combustion using a CFD-based approach / F. Shirinzadeh, R.M. Barough, A.A. Orang // Bulgarian Chemical Communications, Vol.47, 2015. – PP. 231–238.
5. Reichling G. Development of numerical methods for the calculation of thermo-acoustic interactions in gas turbine combustion chambers // Institute of combustion technology for aerospace engineering university of Stuttgart, 2014. – P. 254.

6. An investigation of air-swirl design criteria for gas turbine combustors through a multi-objective CFD optimization / M.M. Torkzadeh, F. Bolourchifard, E. Amani // Fuel 186, 2016. – PP. 734–749.

7. Стационарная трехмерная модель горения топливных газов / Н.Л. Бачев, О.А. Бетинская, Р.В. Бульбович // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника №41, 2015. – С. 103–118.

8. Computational modeling of the working process in the combustion chamber for casing-head gas recovery / N.L. Bachev, O.A. Betinskaya, and R.V. Bulbovich // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 89, № 1, 2016. – PP. 221–229.

9. Sjoerd P. Acoustic of turbulent non-premixed syngas combustion. Proefschrift // Enschede, The Netherlands, 2007. – P. 205.

УДК 66.047.4.5

А. С. Юрпольский, Л. А. Зайнуллин

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

АППАРАТ ДЛЯ СУШКИ УГОЛЬНОГО КОНЦЕНТРАТА ТВЕРДЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Аннотация

Исследован и испытан в лабораторных условиях новый метод сушки угольного концентрата с помощью твердого теплоносителя, а именно, металлическими шарами, разработанный ОАО «ВНИИМТ». Этот способ сушки основан на контакте твердого теплоносителя с высушиваемым материалом. Вследствие большей поверхности контакта твердого теплоносителя с мелкими частицами скорость процесса сушки значительно ускоряется, а значит, сокращается время сушки. Было посчитано соотношение количества шаров, к количеству материала; выбрана оптимальная температура шаров; посчитан расход топлива на сушку; определены габариты барабанной установки.

Так же была проведена сравнительная характеристика барабанных сушилок с газообразным и твердым теплоносителем, вследствие которой были выявлены преимущества барабанных сушилок с твердым теплоносителем.

Ключевые слова: сушильный агрегат; твердый теплоноситель; угольный концентрат; экономия топлива; газообразный теплоноситель.

Abstract

Examined and tested in the laboratory a new method for drying coal concentrate with the help of a solid heat carrier, namely, metal balls, developed by JSC VNIIMT. This method of drying is based on the contact of the solid heat carrier with the material to be dried. Due to the large contact surface of the solid coolant with fine particles, the speed of the drying process is significantly accelerated, which means that the drying time is shortened. The ratio of the number of balls to the amount of material was calculated; The optimal temperature of the balls was chosen; Calculated the fuel consumption for drying; The dimensions of the drum set are determined.

Also, a comparative analysis of drum dryers with gaseous and solid coolant was carried out, due to which the advantages of drum dryers with a solid coolant were revealed.

Keywords: drying unit; solid coolant; coal concentrate; fuel economy; gaseous coolant.

В настоящее время в промышленных масштабах для сушки различных сыпучих материалов (концентраты, руда, уголь, песок и др.) используют барабанные сушилки с газообразным теплоносителем.

В качестве примера на рисунке 1 представлена принципиальная схема установки для сушки угля газообразным теплоносителем в барабанной сушилке. Сырой уголь из бункера 1